



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGUNAAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK
PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA RANGKAIAN PENYEARAH
SATU FASA**

Esty Wulandari
NRP 2212106078

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, MMT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

BUCK-BOOST CONVERTER FOR POWER FACTOR CORRECTION OF A SINGLE PHASE RECTIFIER

Esty Wulandari
NRP 2212106078

Supervisors
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Soedibyo, MMT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty Of Industry Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2015

**PENGUNAAN *BUCK-BOOST CONVERTER* UNTUK
PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA RANGKAIAN
PENYEARAH SATU FASA**


TUGAS AKHIR


Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dedet Candra Riawan ST.M.Eng.PhD
NIP 197311192000031001


Dr. Ir. Soedibyo, MMT
NIP 195512071980031004

**SURABAYA
JUNI, 2015**

PENGUNAAN *BUCK-BOOST CONVERTER* UNTUK PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA RANGKAIAN PENYEARAH SATU FASA

Nama Mahasiswa : Esty Wulandari
NRP : 2212106078
Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan ST,M.Eng,PhD
NIP : 197311192000031001
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, MMT
NIP : 195512071980031004

ABSTRAK

Penyearah satu fasa gelombang penuh berbasis dioda mempunyai faktor daya yang rendah. Hal ini diakibatkan oleh penggunaan kapasitor di sisi keluaran (DC). Pemasangan kapasitor ini bertujuan untuk mengurangi *ripple* tegangan keluaran penyearah satu fasa. Penyearah satu fasa tidak terkontrol yang dikombinasikan dengan rangkaian *buck-boost converter* akan digunakan untuk perbaikan faktor daya dan akan dioperasikan dalam *discontinuous conduction mode (DCM)*. Untuk membuat *buck-boost converter* bekerja pada DCM maka diperlukan sebuah teknik *switching*. Sedangkan untuk mendapatkan tegangan keluaran yang *ripple* tegangan kurang dari 1% maka pada sistem digunakan rangkaian *buck converter* yang langsung dihubungkan pada keluaran *buck-boost converter*. Pengoperasian pada *buck converter* juga dilakukan dalam DCM.

Kata kunci : Penyearah Satu Fasa, DC-DC Converter, *Pulse Width Modulatin (PWM)*, Perbaikan Faktor Daya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BUCK-BOOST CONVERTER FOR POWER FACTOR CORRECTION OF A SINGLE PHASE RECTIFIER

Student Name : Esty Wulandari
Id Number : 2212106078
Supervisor I : Dedet Candra Riawan ST,M.Eng,PhD
Id Number : 197311192000031001
Supervisor II : Dr. Ir. Soedibyo, MMT
Id Number : 195512071980031004

ABSTRACT

Single phase uncontrolled full wave rectifier has a low power factor. This is caused by the use of capacitors on the output side (DC). Installation of capacitors aims to reduce the output voltage ripple of single phase rectifier. Single phase uncontrolled rectifier combined with a series of buck-boost converter will be used for power factor correction and will be operated in discontinuous conduction mode (DCM). To make a buck-boost converter works in DCM then required a switching technique. Meanwhile, to obtain the output voltage ripple voltage is less than 1%, then the system used buck converter circuit which is directly connected to the output buck-boost converter. The operation of the buck converter is also in DCM.

Keywords : Single Phase Rectifier, DC-DC Converter, Pulse Width Modulation (PWM), Power Factor Correction.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Tidak lupa penyusun menyadari bahwa ini semua juga atas bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu dengan penuh rasa hormat dan rendah hati, penyusun mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kepada kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan dukungan dan doa.
3. Kepada Bapak Dedet Candra Riawan ST,M.Eng,PhD dan Dr. Ir. Soedibyo, MMT atas bimbingan selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen penguji atas arahan dan kritikan yang telah diberikan demi kesempurnaan alat yang kami buat.
5. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan di jurusan Teknik Elektro ITS atas fasilitas dan waktu yang diberikan.
7. Semua teman-teman mahasiswa Lintas Jalur Teknik Elektro ITS angkatan 2011 semester ganjil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Akhir kata, segala kritik dan saran sangat saya harapkan untuk pengembangan selanjutnya.

Surabaya, 4 Juni 2015

Penyusun

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan	1
1.4 Metode Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
1.6 Relevansi	3

BAB II PENYEARAH GELOMBANG PENUH, DC-DC KONVERTER DAN FAKTOR DAYA

2.1 Perencanaan Rangkaian Penyearah	5
2.1.1 Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa Tak Terkontrol...	5
2.1.2 Filter LC Untuk Penyearah	7
2.1.3 Faktor Daya	8
2.2 Harmonisa pada Penyearah	10
2.2.1 Pengaruh Harmonisa Terhadap Faktor Daya	10
2.2.3 Deret Fourier	11
2.3 DC Chopper	13
2.4.1 Prinsip Operasi Step-Up (Boost)	13
2.4.2 Prinsip Operasi Step-Down (Buck)	15
2.4.3 Prinsip Operasi Step Up and Down (Buck-Boost).....	22

BAB III KONFIGURASI DAN DESAIN *BUCK-BOOST* KONVERTER UNTUK PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA PENYEARAH SATU FASA

3.1 Konfigurasi Sistem	25
3.2 Desain Sistem	26
3.2.1 Desain Penyearah Satu Fasa Tidak Terkontrol	26
3.2.2 Desain Filter	27
3.2.3 Desain Buck-Boost Converter	28
3.2.4 Desain Buck Converter.....	31
3.2.5 Kontrol DC-DC Converter	34

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA

4.1 Penyearah AC-DC Konvensional	37
4.2 Penyearah AC-DC dengan Buck-Boost Converter untuk Perbaikan Faktor Daya	41
4.2.1 Penyearah AC-DC	41
4.2.2 Buck-Boost Converter	42
4.2.3 Buck Converter.....	45
4.2.4 Penyearah AC-DC dengan PFC dan Regulasi Tegangan	47
4.3 Perbandingan Penyearah AC-DC Konvensional dan Penyearah AC-DC dengan Buck-Boost Converter untuk Perbaikan Faktor Daya ..	51

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53

DAFTAR PUSTAKA	55
-----------------------------	----

BIODATA PENULIS	57
------------------------------	----

LAMPIRAN	59
-----------------------	----

DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 4.1 Data hasil simulasi penyearah AC-DC konvensional	40
Tabel 4.2 Data hasil simulasi penyearah AC-DC dengan <i>buck-boost converter</i> untuk perbaikan faktor daya	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Penyearah Gelombang Penuh Tak Terkontrol 1 Fasa.....5
Gambar 2.2	Gelombang Tegangan <i>Input</i> dan <i>Output</i> Penyearah 6
Gambar 2.3	Gelombang Arus <i>Input</i> dan <i>Output</i> Penyearah 7
Gambar 2.4	Filter AC..... 8
Gambar 2.5	Diagram Fasor 9
Gambar 2.6	Gelombang Tegangan dan Arus 10
Gambar 2.7	Gelombang Input Arus dan Tegangan pada Penyearah . 10
Gambar 2.8	Chopper <i>Step-Up</i> 14
Gambar 2.9	Rangkaian chopper <i>step-down</i> 15
Gambar 2.10	Arus Induktor CCM..... 16
Gambar 2.11	Arus Induktor DCM 17
Gambar 2.12	Buck-Boost Converter 20
Gambar 2.13	Arus Induktor CCM..... 21
Gambar 2.14	Arus Induktor DCM 21
Gambar 2.15	Perbandingan Mode Operasi Rangkaian Perbaikan Faktor Daya..... 22
Gambar 2.16	Pemilihan Jenis Konverter untuk PFC..... 23
Gambar 3.1	Konfigurasi Sistem 25
Gambar 3.2	Penyearah AC-DC satu fasa Tidak Terkontrol dengan Filter Input 27
Gambar 3.3	Rangkaian <i>Buck-Boost Converter</i> 30
Gambar 3.4	Rangkaian <i>Buck Converter</i> 31
Gambar 3.5	Kontrol pada <i>Buck-Boost Converter</i> 35
Gambar 3.6	Kontrol pada <i>Buck Converter</i> 35
Gambar 4.1	Rangkaian Penyearah AC-DC 39
Gambar 4.2	Tegangan Output Penyearah AC-DC 39
Gambar 4.3	Tegangan Input Penyearah AC-DC 40
Gambar 4.4	Arus Input Penyearah AC-DC..... 40
Gambar 4.5	Grafik Perubahan Daya Beban Terhadap Faktor Daya.. 41
Gambar 4.6	Tegangan <i>Input</i> Penyearah AC-DC 42
Gambar 4.7	Tegangan <i>Output</i> Penyearah AC-DC 42
Gambar 4.8	Arus <i>Output</i> pada <i>Buck-Boost Converter</i> 43
Gambar 4.9	Tegangan <i>Output</i> <i>Buck-Boost Converter</i> 43
Gambar 4.10	Bentuk Gelombang pada satu Periode <i>Switching</i> 44

Gambar 4.11 Tegangan <i>Output</i> pada <i>Buck Converter</i>	45
Gambar 4.12 Arus <i>Output</i> pada <i>Buck Converter</i>	45
Gambar 4.13 Bentuk Gelombang pada satu Periode <i>Switching</i>	46
Gambar 4.14 Tegangan Input.....	48
Gambar 4.15 Arus Input	48
Gambar 4.16 Tegangan Output Beban 100Watt	48
Gambar 4.17 Tegangan Output Beban 90 Watt	49
Gambar 4.18 Grafik Perubahan Daya Beban R Terhadap Tegangan <i>Output</i>	50
Gambar 4.19 Grafik Perubahan Daya Beban Terhadap Faktor Daya .	50

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas penyaluran daya menjadi tuntutan untuk memperbaiki faktor daya. Hal ini juga berlaku pada penyaluran daya DC. Sehingga penggunaan rangkaian penyearah satu fasa juga harus dijaga kualitas dayanya. Seperti yang kita ketahui rangkaian penyearah satu fasa adalah rangkaian yang mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC [1]. Pada prosesnya, rangkaian ini mengalami banyak fenomena untuk mencapai tegangan keluaran yang diinginkan. Pada rangkaian ini digunakan kapasitor di sisi keluaran untuk *filter* dan mengurangi *ripple* tegangan keluaran. Konsekuensi dari penyearah tersebut menyebabkan bentuk gelombang arus menjadi tidak rata dan mengandung harmonisa [1,5]. Hal ini yang mengakibatkan kualitas daya pada rangkaian penyearah menjadi turun, karena dengan adanya harmonisa pada rangkaian maka secara otomatis faktor daya sistem juga akan turun dan membuat suhu komponen elektronika meningkat (*stress* pada komponen elektronika) [2-4].

Adanya standar tentang harmonisa juga menjadi salah satu pertimbangan dilakukannya penelitian ini. Berdasarkan standar IEC 61000-3-2 yang digunakan beberapa Negara di dunia bahwa terdapat tetapan nilai harmonisa yang diijinkan pada suatu sistem [3,5]. Standar yang biasa digunakan di Indonesia (PUIL 2000) juga di tetapkan nilai harmonisa yang diijinkan yaitu 10% untuk tegangan dan 5% untuk arus. Untuk itu diperlukan suatu rangkaian *power supply* yang mempunyai kualitas yang sangat tinggi seperti efisiensi yang tinggi dan harmonisa yang kecil.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam penyelesaian Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana cara memperbaiki faktor daya keluaran penyearah satu fasa dengan menggunakan rangkaian *Buck-Boost converter* .

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah :

Merancang dan membuat simulasi rangkaian DC-DC *converter* untuk perbaikan faktor daya dan regulasi tegangan *output* pada penyearah satu fasa.

1.4 Metode Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dibagi menjadi beberapa tahap :

1. Studi literatur mengenai prinsip kerja rangkaian penyearah satu fasa, teknik *switching*, *buck-boost* konverter, dan *buck* konverter.
2. Perancangan simulasi rangkaian *buck-boost* konverter untuk perbaikan faktor daya.
3. Perancangan simulasi rangkaian *buck* konverter untuk mendapatkan tegangan keluaran yang *steady state*.
4. Menganalisa kinerja simulasi rangkaian yang direncanakan.

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

- Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.
- Bab 2 : Dasar teori yang merupakan penjelasan teori mengenai prinsip kerja rangkaian penyearah, DC-DC konverter secara umum, dan pengertian faktor daya.
- Bab 3: Desain dan prinsip kerja *buck-boost* konverter untuk perbaikan faktor daya pada penyearah satu fasa gelombang penuh.
- Bab 4: Hasil simulasi dan analisa rangkaian *buck-boost* konverter untuk perbaikan faktor daya pada penyearah satu fasa gelombang penuh.
- Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan hasil pembahasan dan saran-saran yang berhubungan dari pokok bahasan tugas akhir.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

Dapat meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang Elektronika Daya bagi pengusul Tugas Akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

PENYEARAH GELOMBANG PENUH, DC-DC KONVERTER DAN FAKTOR DAYA

2.1 Perencanaan Rangkaian Penyearah

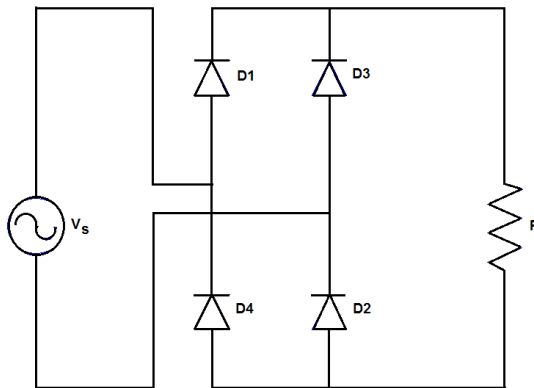
2.1.1 Penyearah Gelombang Penuh Satu Fasa Tak Terkontrol

Rangkaian penyearah dioda banyak digunakan pada aplikasi-aplikasi industri. Meskipun banyak digunakan rangkaian penyearah jenis ini memiliki kelemahan yaitu memiliki tegangan keluaran yang tetap. Oleh karena itu penyearah jenis ini disebut juga penyearah tak terkontrol (*uncontrolled rectifier*). Gambar 2.1 memperlihatkan rangkaian penyearah gelombang penuh satu fasa tak terkontrol. Gambar 2.2 dan 2.3 adalah gelombang tegangan dan arus pada penyearah dioda jembatan. Biasanya pada sisi dc dipasang *filter* kapasitor yang besar [11]. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *ripple* tegangan.

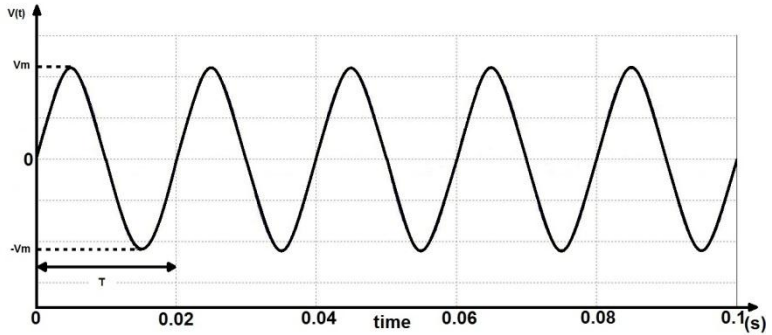
Selama periode setengah cycle positif dari tegangan input, aliran daya mengalir ke beban melalui dioda D1 dan D2. Sedangkan D3 dan D4 bias mundur. Selama negatif cycle, D3 dan D4 mengalami bias maju, D1 dan D2 bias mundur [6].

Tegangan sumber yang digunakan adalah v_s , sehingga:

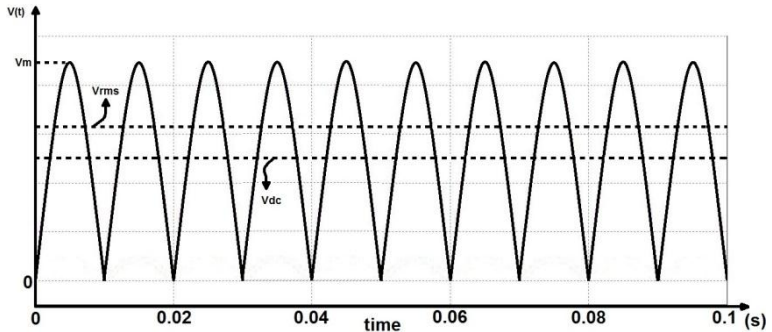
$$v_s(t) = \sqrt{2}V_{rms} \sin \omega t = V_m \sin \omega t \dots \dots \dots (2.1)$$



Gambar 2.1 Penyearah Gelombang Penuh Tak Terkontrol 1 Fasa.



(a) Gelombang Tegangan *Input*



(b) Gelombang Tegangan *Output*

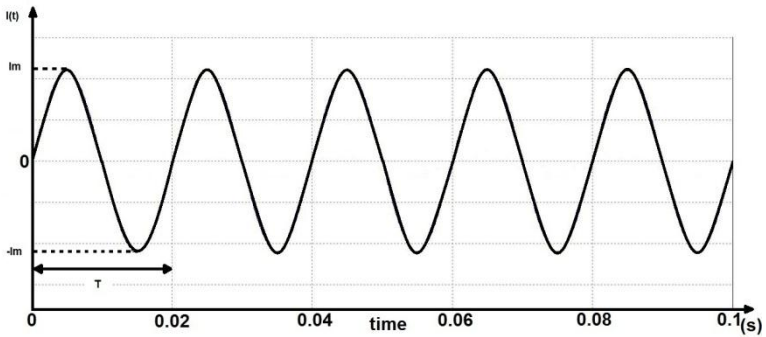
Gambar 2.2 Gelombang Tegangan Penyearah Dioda Jembatan

Dimana V_{rms} dan V_m adalah nilai efektif dan amplitude dari tegangan *input* [4]. Dan tegangan *output* rata-ratanya bernilai:

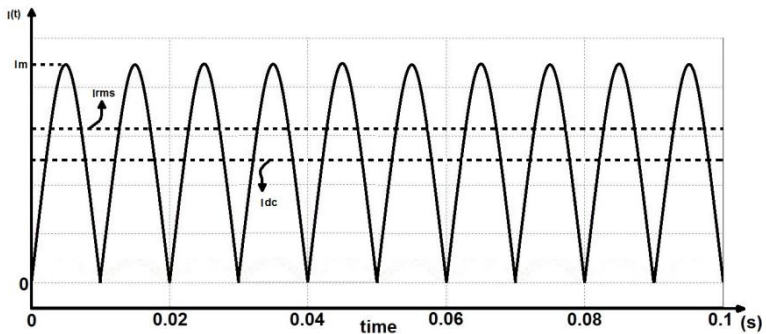
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.6366V_m \dots \dots \dots (2.2)$$

Arus *output* rata-rata nya adalah:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{0.6366}{R}V_m \dots \dots \dots (2.3)$$



(a) Gelombang Arus *Input*



(b) Gelombang Arus *Output*

Gambar 2.3 Gelombang Arus Penyearah Dioda Jembatan

Besar tegangan dan arus rms nya adalah:

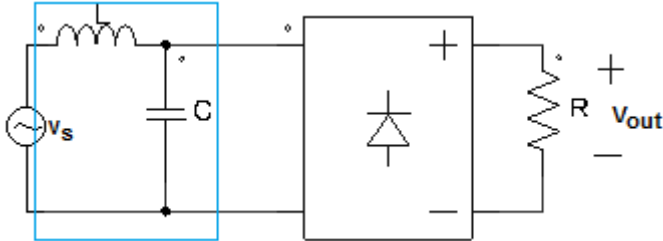
$$V_{rms} = \left[\frac{2 \int_0^T (V_m \sin \omega t)^2 dt}{T} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m \dots \dots \dots (2.4)$$

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} = \frac{0.707 V_m}{R} \dots \dots \dots (2.5)$$

2.1.2 Filter LC Untuk Penyearah

Dalam mendesain atau merencanakan rangkaian penyearah akan melibatkan penentuan rating dioda semikonduktor. Rating dioda

biasanya ditentukan dalam arus rata-rata, arus rms, arus puncak, dan tegangan balik puncak. Tidak ada prosedur yang baku untuk mendesain, tetapi hal tersebut diperlukan untuk menentukan bentuk arus dan tegangan dioda. Setiap keluaran dari penyearah mengandung harmonisa. Filter dapat digunakan untuk mengurangi efek dari harmonisa.



Gambar 2.4 Filter AC

Karena adanya penyearahan, arus masukan penyearah mengandung pola harmonisa sehingga diperlukan filter AC untuk memfilter beberapa harmonisa dari sistem sumber. Filter AC biasanya jenis LC seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Frekuensi cutt-off dalam Hz dari filter ini adalah:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (2.6)$$

2.1.3 Faktor Daya

Sebagian besar peralatan memerlukan dua komponen arus. Kedua komponen arus tersebut adalah sebagai berikut:

1. Arus yang menghasilkan daya kerja adalah arus yang dikonversikan oleh peralatan menjadi kerja, umumnya dalam bentuk panas, cahaya dan daya mekanik. Satuan daya kerja yang dihasilkan adalah Watt.
2. Arus magnetisasi, juga disebut wattless, reaktif, adalah arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks dalam pengoperasian peralatan elektromagnetis. Tanpa arus magnetis, energi tidak mengalir melalui transformator atau menembus celah udara pada motor induksi, daya reaktif yang dihasilkan diukur dalam satuan Var.

Fasor diagram kedua komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5. Gambar 2.5 (a) ini memperlihatkan penjumlahan secara

vektoris dari arus aktif dan arus reaktif yang menghasilkan arus total, dinyatakan dalam persamaan:

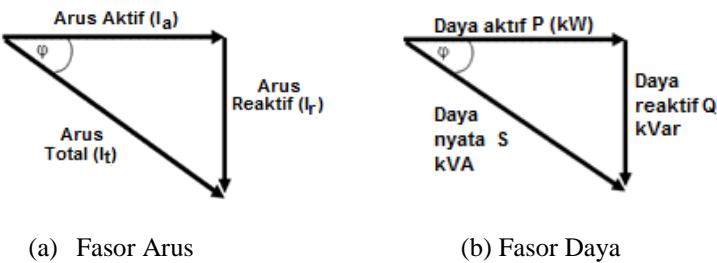
$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_t = \sqrt{(I\cos\varphi)^2 + (I\sin\varphi)^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada Gambar 2.5a dan Gambar 2.5b menunjukkan diagram fasor untuk daya yang identik dengan arus. Pada suatu tegangan V, daya aktif P, daya reaktif Q dan daya total S adalah sebanding dengan arus dan dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$VI = \sqrt{(VI\cos\varphi)^2 + (VI\sin\varphi)^2} \dots\dots\dots (2.8)$$



Gambar 2.5 Diagram Fasor

Dalam perhitungan daya, faktor daya memegang peran sangat penting. Faktor daya merupakan ukuran daya yang dikirim antara sumber dan beban. Faktor daya (cosφ) bervariasi antara 0 sampai dengan 1. Arus dan tegangan pada sisi input diharapkan sefasa untuk mendapatkan faktor daya satu [12].

Secara umum faktor daya dirumuskan sebagai berikut:

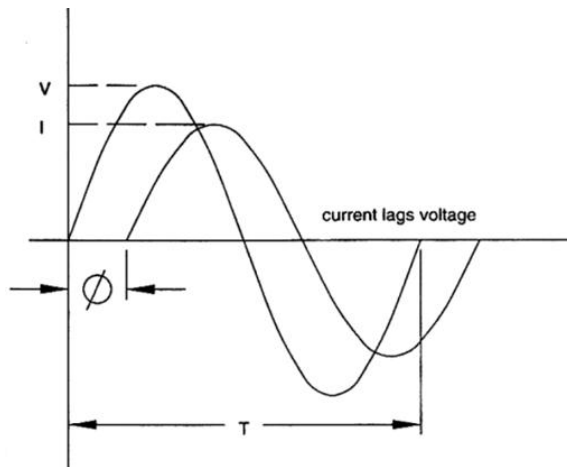
$$Cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms}I_{rms}} = \frac{kW}{kVA} \dots\dots\dots (2.9)$$

2.2 Harmonisa pada Penyearah

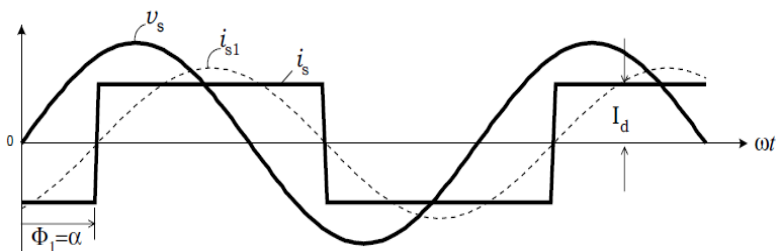
2.2.1 Pengaruh Harmonisa Terhadap Faktor Daya

Bila arus dan tegangan berbentuk sinusoidal, maka faktor daya didefinisikan sebagai cosinus sudut yang dibentuk antara simpangan nol arus dengan nol tegangan sebagai acuan. Ilustrasinya diperlihatkan pada Gambar 2.6

Gambar 2.6 memperlihatkan cosinus sudut yang dibentuk antara simpangan nol tegangan dan nol arus. Permasalahan muncul apabila salah satu atau kedua besaran tidak sinusoidal.



Gambar 2.6 Gelombang Tegangan dan Arus



Gambar 2.7 Gelombang Input Arus dan Tegangan pada Penyearah

Gambar 2.7 menunjukkan bentuk tegangan dan arus masukan beserta komponen fundamental arus bila arus dan atau tegangan tidak sinusoidal.

Dengan memperlihatkan bentuk gelombang pada gambar diatas, V_s adalah tegangan masukan sinusoidal, I_s adalah komponen fundamentalnya. Jika $\cos\phi$ merupakan sudut yang dibentuk antar komponen arus dan tegangan masukan , dan juga disebut *displacement factor*.

$$DF = \cos\phi \dots \dots \dots (2.10)$$

Harmonic Factor dari arus input didefinisikan sebagai:

$$HF = \left[\frac{I_s^2 - I_{s1}^2}{I_{s1}^2} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\left(\frac{I_s}{I_{s1}} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.11)$$

Faktor harmonisa adalah ukuran distorsi bentuk gelombang dan biasanya disebut dengan THD[8]. I_{s1} adalah komponen fundamental dari I_s . I_s dan I_{s1} dalam satuan rms. Faktor daya dari arus input didefinisikan sebagai:

$$PF = \left[\frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \right] \cos\phi = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos\phi \dots \dots \dots (2.12)$$

Bila arus masukan I_s merupakan sinusoidal murni, $I_{s1}=I_s$ dan faktor daya (PF) sama dengan faktor displacement (DF).

2.2.2 Deret Fourier

Setiap gelombang periodik yakni yang memiliki bentuk $f(t)=f(t+T)$ dapat dinyatakan oleh sebuah deret fourier bila memenuhi persyaratan Dirichlet:

1. Bila gelombang diskontinyu, hanya terdapat jumlah diskontinyuitas yang terbatas dalam periode T.
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas dalam periode T.

3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum dalam periode T.

Bila syarat-syarat tersebut dipenuhi, deret fourier dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \dots \dots \dots (2.13)$$

Secara umum, tegangan dan arus dapat dinyatakan dalam deret fourier sebagai:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_n + \varphi_n) \dots \dots \dots (2.14)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega_n + \varphi_n) \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \dots \dots \dots (2.16)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \dots \dots \dots (2.17)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana n adalah orde harmonisa yaitu bilangan 1,2,3,...dst. Pada kasus di sistem tenaga listrik, umumnya orde yang dominan adalah orde ganjil saja (1,3,5,...dst). Orde n=1 menyatakan komponen dasar atau fundamental dari gelombang. Suku a_0 menyatakan komponen dc atau nilai rata-rata dari gelombang yang mana umumnya komponen ini tidak muncul dalam jaringan sistem bolak-balik. Bila gelombang arus atau tegangan berbentuk sinusoidal sempurna, maka orde n=1 saja yang

muncul. Gelombang yang cacat (terdistorsi) memiliki koefisien-koefisien indeks n. Amplitudo harmonisa biasa dinyatakan sebagai:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad , n \geq 1 \dots \dots \dots (2.19)$$

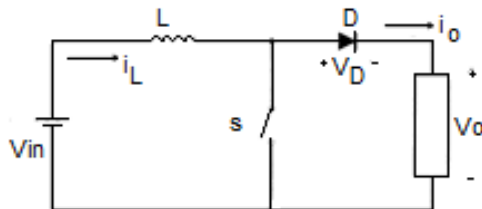
Nilai c sebagai fungsi n sering kali digambarkan dalam suatu *barchart* dan dikenal dengan sebutan spektrum frekuensi gelombang. Tingkat kecacatan sering kali dinyatakan dengan THD (*Total Harmonic Distortion*) disebut juga *harmonic factor* (HF), digunakan untuk tegangan maupun arus. THD dapat dirumuskan sebagai fungsi rms suatu tegangan atau arus. Mengukur harmonisa berarti menggambarkan ekstra panas yang tinggi dan juga ekstra rugi-rugi di jaringan.

2.3 DC Chopper [11]

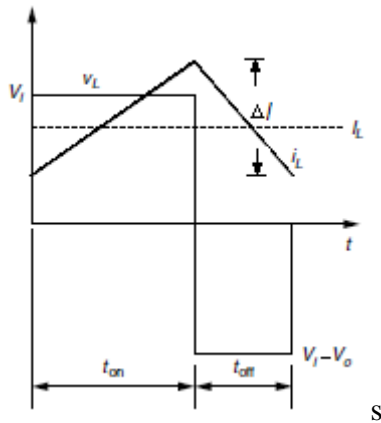
DC chopper pada aplikasi industri, diperlukan untuk mengubah sumber tegangan dc tetap menjadi sumber tegangan dc yang bersifat variabel. DC chopper mengubah secara langsung sumber tegangan dc ke dc dan biasanya disebut konverter dc-dc. Chopper dapat berfungsi seperti trafo, yaitu dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan sumber tegangan dc. DC chopper dapat bekerja dalam tiga mode, yaitu *continous conduction mode (CCM)*, *discontinous conduction mode (DCM)*, dan *boundary conduction mode (BCM)*

2.3.1 Prinsip Operasi Step-Up (Boost)

Chopper dapat digunakan untuk menaikkan tegangan dc dan rangkaian untuk operasi *step-up* ditunjukkan pada Gambar 2.8a. Pada kondisi CCM, ketika saklar s ditutup untuk waktu tertentu (*t on*), arus induktor naik dan energi disimpan dalam induktor L. Jika saklar dibuka pada waktu tertentu (*t off*) energi yang tersimpan pada induktor akan ditransfer ke beban melalui dioda dan arus induktor turun.



(a) Rangkaian Chopper Step-Up



(b) Arus Induktor Chopper *Step-Up*
Gambar 2.8 Chopper *Step-Up*

Dengan mengasumsikan aliran arus kontinyu, bentuk gelombang untuk arus induktor ditunjukkan dalam Gambar 2.8b. Ketika chopper dinyalakan, tegangan yang melewati induktor:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dan *ripple peak to peak* arus induktor:

$$\Delta I = \frac{V_i}{L} t_{on} \dots \dots \dots (2.21)$$

Tegangan output:

$$V_o = V_i + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_i \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) = V_i \frac{1}{1-D} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dari persamaan 2.22 tegangan keluaran dapat dinaikkan dengan memvariasikan *duty ratio* D, dan tegangan keluaran minimum V_i ketika $D=0$. Bagaimanapun, chopper tidak dapat dioperasikan secara kontinyu

sedemikian hingga $D=1$. Untuk nilai D menjadi unit, tegangan keluaran menjadi sangat besar.

2.3.2 Prinsip Operasi *Step-Down (Buck)*

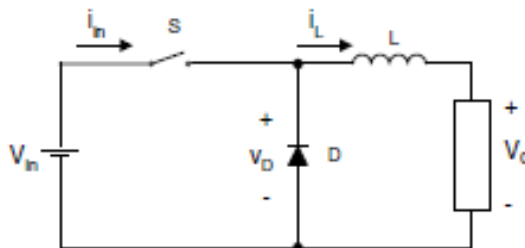
Seperti namanya, konverter *step-down* menghasilkan tegangan *average* yang lebih rendah pada sisi keluaran dibandingkan dengan tegangan *input*. Rangkaian ini biasanya digunakan untuk DC *power supplies* dan kontrol kecepatan motor DC. Gambar 2.9 menunjukkan rangkaian umum dari konverter *step-down*.

2.3.2.1 *Continuous-Conduction Mode*

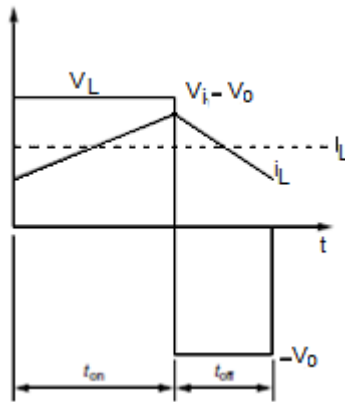
Gambar 2.13 adalah bentuk gelombang arus induktor pada operasi CCM dimana arus induktor mengalir secara kontinyu ($i_L(t) > 0$). Saat *switch on* selama durasi waktu t_{on} , *switch* akan menghantarkan arus induktor dan dioda menjadi *reverse bias*. Hal ini menghasilkan tegangan positif $v_L = V_i - V_o$ yang melewati induktor. Tegangan ini menyebabkan arus induktor naik secara linier. Saat *switch off*, karena masih terdapat energi yang tersimpan pada induktor, i_L mengalir secara kontinyu. Arus ini mengalir ke dioda dan $v_L = -V_o$.

Pada saat operasi *steady state* bentuk gelombang akan terus berulang dari satu periode ke periode berikutnya, integral dari tegangan induktor dalam satu periode = 0, dimana $T_s = t_{on} + t_{off}$:

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0$$



Gambar 2.9 Rangkaian chopper *step-down*



Gambar 2.10 Arus Induktor CCM

Pada gambar 2.10 menunjukkan bahwa area tegangan pada saat *on* sama dengan area saat *off*. Sehingga:

$$(V_i - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on})$$

atau

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \dots \dots \dots (2.23)$$

Dengan mengabaikan rugi daya pada semua elemen rangkaian, daya input sama dengan daya output:

$$P_i = P_o$$

sehingga

$$V_i I_i = V_o I_o$$

dan

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{V_i}{V_o} = \frac{1}{D} \dots \dots \dots (2.24)$$

2.3.2.2 *Discontinuous-Conduction Mode*

Tergantung pada aplikasi konverter ini , baik tegangan input atau tegangan output tetap konstan selama beroperasi. Kedua tipe ini akan dibahas pada bahasan selanjutnya.

2.3.2.2.1 *Discontinuous-Conduction Mode* dengan konstan V_i

Pada aplikasi seperti kontrol kecepatan motor dc, Cdi jaga tetap konstan dan V_o dikontrol dengan mengatur nilai *duty ratio* D .

Selama $V_o = D V_i$, arus induktor rata-rata pada batas CCM adalah:

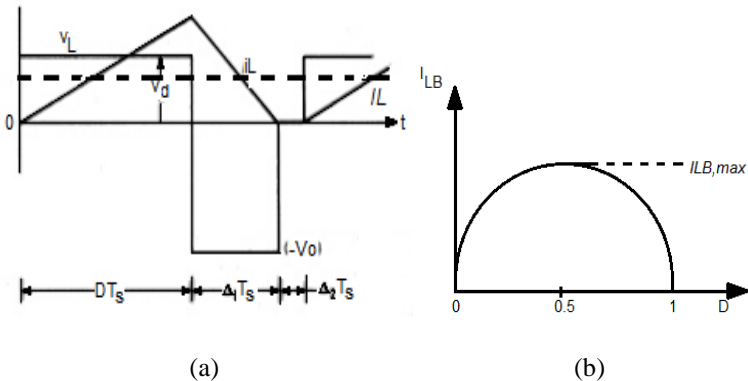
$$I_{LB} = \frac{T_s V_i}{2L} D(1 - D) \dots \dots \dots (2.25)$$

Dengan menggunakan persamaan ini saat kondisi arus induktor maksimum yaitu pada $D=0.5$, maka:

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_i}{8L} \dots \dots \dots (2.26)$$

dari persamaan 2.25 dan 2.26

$$I_{LB} = 4I_{LB,max} D(1 - D) \dots \dots \dots (2.27)$$



Gambar 2.11 Arus Induktor DCM

Kemudian rasio tegangan V_o/V_i akan dihitung dalam kondisi DCM. Asumsikan bahwa konverter bekerja pada batas kerja CCM untuk memberikan nilai dari T , L , V_i , dan D . Jika parameter tersebut konstan dan daya output beban diturunkan (resistansi beban naik), maka arus induktor rata-rata akan turun. Seperti digambarkan pada Gambar 2.11, ini menunjukkan tegangan output yang lebih tinggi dari sebelumnya dan menghasilkan arus induktor yang diskontinyu.

Selama selang waktu $\Delta_2 T_s$ saat arus induktor adalah nol, daya yang mengalir ke beban adalah dari filter kapasitor. Tegangan induktor selama selang waktu ini adalah nol. Sama dengan CCM, menyamakan integral dari tegangan induktor selama satu periode = nol:

$$(V_i - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0 \dots \dots \dots (2.28)$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{D + \Delta_1} \dots \dots \dots (2.29)$$

dimana $D + \Delta_1 < 1.0$.

Dari gambar 2.11,

$$I_{L,peak} = \frac{V_o}{L}\Delta_1 T_s \dots \dots \dots (2.30)$$

sehingga,

$$I_o = I_{L,peak} \frac{D + \Delta_1}{2} \dots \dots \dots (2.31)$$

$$= \frac{V_o T_s}{2L} (D + \Delta_1) \Delta_1 \text{ (dari persamaan 2.30) } \dots \dots \dots (2.32)$$

$$= \frac{V_i T_s}{2L} D \Delta_1 \text{ (dari persamaan 2.29) } \dots \dots \dots (2.33)$$

$$= 4I_{LB,max} D \Delta_1 \text{ (dari persamaan 2.26) } \dots \dots \dots (2.34)$$

$$\therefore \Delta_1 = \frac{I_o}{4I_{LB,max} D} \dots \dots \dots (2.35)$$

Dari persamaan 2.29 dan 2.35

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \right)} \dots \dots \dots (2.36)$$

2.3.2.2.2 *Discontinuous-Conduction Mode* dengan konstan V_o

Pada aplikasi seperti dc power supplies, V_i bisa berubah-ubah tetapi V_o tetap konstan dengan mengatur *duty ratio* D .

Karena $V_i = V_o/D$, arus induktor rata-rata pada batas CCM dari persamaan 2.21 adalah

$$I_{LB} = \frac{T_s V_o}{2L} (1 - D) \dots \dots \dots (2.37)$$

Persamaan 2.37 menunjukkan bahwa jika V_o dijaga konstan, nilai maksimum dari I_{LB} saat $D = 0$:

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \dots \dots \dots (2.38)$$

Harus diperhatikan bahwa operasi sesuai dengan $D = 0$ dan V_o terbatas akan memerlukan V_i untuk menjadi tak terbatas.

Dari persamaan 2.37 dan 2.38

$$I_{LB} = (1 - D) I_{LB,max} \dots \dots \dots (2.39)$$

Dari persamaan 2.29, 2.32, dan 2.38 untuk V_o tetap konstan,

$$D = \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{\left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \right)}{1 + \frac{V_o}{V_i}} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.40)$$

2.3.3 Prinsip Operasi Step Up and Down (*Buck-Boost*)

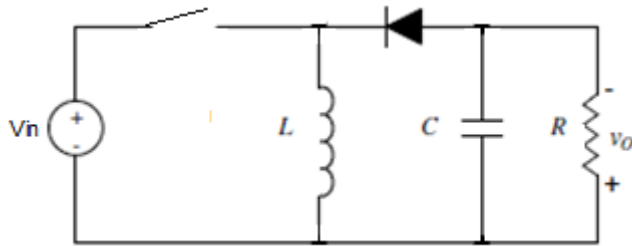
Aplikasi utama dari konverter ini adalah untuk *regulated dc power supplies*, dimana polaritas negatif tegangan mungkin dibutuhkan,

dan tegangan *output* dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan *input*.

Buck-boost konverter terdiri dari dua konverter dasar (*step up* dan *step down* konverter) yang dihubungkan kaskade. Dalam kondisi steady, konversi rasio tegangan *output-input* adalah konversi rasio dari kedua konverter:

$$\frac{V_o}{V_i} = D \frac{1}{1 - D} \text{ (dari persamaan 2.22 dan 2.23) ... (2.41)}$$

Dengan persamaan 2.41 menunjukkan bahwa tegangan output dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan input berdasarkan *duty ratio* D . Hubungan kaskade antara *buck* konverter dan *boost* konverter dapat digabungkan menjadi sebuah rangkaian *buck-boost* konverter seperti Gambar 2.12



Gambar 2.12 Buck-Boost Converter

2.3.3.1 Continuous-Conduction Mode

Gambar 2.13 menunjukkan bentuk gelombang arus induktor pada mode CCM dimana arus induktor mengalir secara kontinyu.

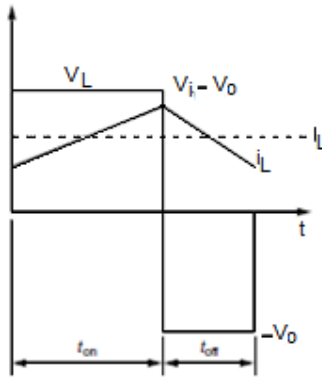
Persamaan integral dari tegangan induktor pada satu periode = 0

$$V_i D T_s + (-V_o)(1 - D) T_s = 0$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1 - D} \text{ (2.42)}$$

dan

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{1 - D}{D} \text{ (asumsi } P_i = P_o) \text{ (2.43)}$$



Gambar 2.13 Arus Induktor CCM

2.3.3.2 *Discontinuous-Conduction Mode*

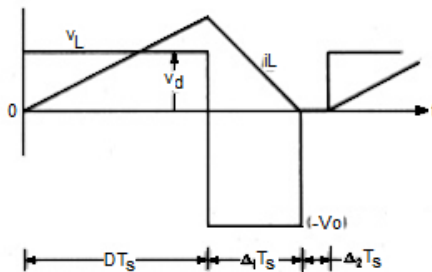
Gambar 2.14 menunjukkan bentuk gelombang diskontinyu i_L . Persamaan integral dari tegangan induktor dalam satu periode = 0,

$$V_i D T_s + (-V_o) \Delta_1 T_s = 0$$

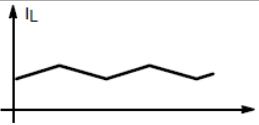
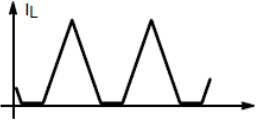

$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{\Delta_1} \dots \dots \dots (2.44)$$

Dari Gambar 2.14

$$I_L = \frac{V_i}{2L} D T_s (D + \Delta_1) \dots \dots \dots (2.45)$$



Gambar 2.14 Arus Induktor DCM

Rating	Symbol	Unit
	Continuous Conduction Mode (CCM)	<ul style="list-style-type: none"> • Always hard-switching • Inductor value is largest • Minimized rms current
	Discontinuous Conduction Mode (DCM)	<ul style="list-style-type: none"> • Highest rms current • Reduce coil inductance • Best stability
	Critical Conduction Mode (CrM)	<ul style="list-style-type: none"> • Largest rms current • Switching frequency is not fixed

Gambar 2.15 Perbandingan Mode Operasi Rangkaian Perbaikan Faktor Daya






Selama V_o tetap konstan , sangat bermanfaat untuk memperoleh fungsi D dari arus output beban untuk berbagai nilai V_o/ V_i . Dengan persamaan yang telah digunakan sebelumnya, didapat bahwa

$$D = \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{I_o}{I_{oB,max}} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (2.46)$$

dimana

$$I_{oB,max} = \frac{T_s V_o}{2L} \dots \dots \dots (2.47)$$

Perbandingan dari mode operasi converter dapat kita lihat pada Gambar 2.15. Maka dari itu pemilihan mode operasi dalam merencanakan sebuah converter sangat penting[7]. Pemilihan jenis converter terlihat pada Gambar 2.16. Dari gambar 2.16 kita dapat mempertimbangkan jenis converter yang bekerja pada mode operasi DCM [9].

Basic converter	Line current waveform	DCM self-PFC	Power level
Buck		Poor	Low to medium
Boost		Good	Low to medium
Buck-Boost		Excellent	Low to medium
Flyback		Excellent	Low
Forward	-	No	-
Cuk, Sepic, Zeta		Poor	Low to medium

Gambar 2.16 Pemilihan Jenis Konverter untuk PFC

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

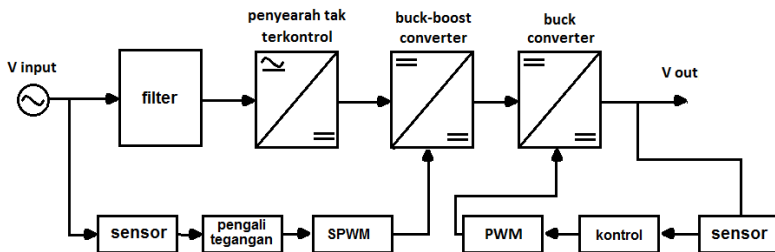
KONFIGURASI DAN DESAIN *BUCK-BOOST* KONVERTER UNTUK PERBAIKAN FAKTOR DAYA PADA PENYEARAH SATU FASA

3.1 Konfigurasi Sistem

Rangkaian yang digunakan pada sistem ini terdiri dari sumber tegangan arus bolak-balik satu fasa, empat buah dioda yang digunakan sebagai penyearah gelombang penuh, *filter* LC pada sisi masukan penyearah, rangkaian *buck-boost converter*, dan rangkaian *buck converter*. Untuk mendapatkan nilai faktor daya yang *unity* digunakan *buck-boost converter* yang beroperasi pada mode DCM dan menggunakan sensor tegangan pada sisi *input*, sehingga sistem menjadi loop tertutup. Dan untuk mendapatkan tegangan *ouput* dengan *ripple* dibawah 1% digunakan *buck converter* yang beroperasi pada mode DCM dengan menggunakan sensor pada sisi *output*. Topologi dari sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Tegangan *input* ac yang digunakan disesuaikan dengan tegangan dari jala-jala yang biasa digunakan yaitu 220 V_{rms}. Tegangan *output* dari *buck converter* dapat diubah-ubah sesuai dengan kebutuhan tegangan yang diinginkan (0-200 V). Frekuensi pensaklaran ditentukan dengan mempertimbangkan nilai kapasitor dan induktor yang dapat berpengaruh terhadap *ripple* arus induktor dan *ripple* tegangan *output*.

Untuk perhitungan secara lengkap mengenai nilai-nilai komponen tersebut akan dibahas pada sub bab selanjutnya.



Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem

3.2 Desain Sistem

Untuk menentukan parameter-parameter komponen yang digunakan pada rangkaian ini, digunakan persamaan-persamaan yang telah dibahas pada bab 2.

3.2.1 Desain Penyearah Satu Fasa Tidak Terkontrol

Rangkaian penyearah berfungsi sebagai sumber dc bagi *buck-boost converter*, *input* dari penyearah berasal dari tegangan jala-jala PLN. Penyearah yang digunakan adalah penyearah tidak terkontrol sehingga membutuhkan 4 buah dioda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Berikut adalah desain dari penyearah ac-dc satu fasa tidak terkontrol.

- $V_{s\ rms} = 220\ V$
- $f = 50\ Hz$

Dari persamaan 2.1 tegangan *input* maksimum adalah:

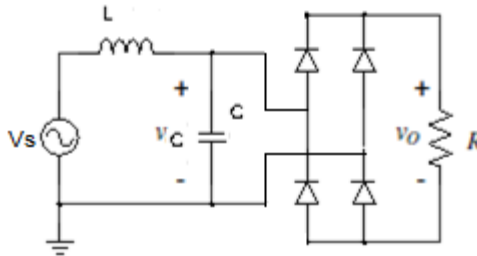
$$\begin{aligned}V_m &= \sqrt{2} \times V_{s\ rms} \\&= \sqrt{2} \times 220 \\&= 311\ V\end{aligned}$$

Maka tegangan *output* rata-rata penyearah berdasarkan persamaan 2.2 adalah:

$$\begin{aligned}V_{DC} &= \frac{2V_{in\ max}}{\pi} \\&= \frac{2 \times 311}{\pi} \\&= 198.06\ V\end{aligned}$$

Dan dengan persamaan 2.4, tegangan output rms dari penyearah adalah:

$$\begin{aligned}V_{rms} &= 0.707V_{in\ max} \\&= 0.707 \times 311 \\&= 220\ V\end{aligned}$$



Gambar 3.2 Penyearah AC-DC satu fasa Tidak Terkontrol dengan *Filter Input*

3.2.2 Desain *Filter*

Seperti yang kita ketahui fungsi filter adalah untuk menahan atau meloloskan sinyal[6]. *Filter* pada sistem ini dipasang di sisi *input* dengan tujuan untuk mengurangi harmonisa seperti pada Gambar 3.2. *Filter* yang digunakan adalah *lowpass filter* yaitu filter yang hanya melewatkan sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi *cut-off* (f_c) dan akan melemahkan sinyal dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *cut-off* (f_c). Nilai induktor yang digunakan adalah 1mH dan kapasitor adalah 0.5 μ F, sehingga:

Spesifikasi filter:

$$V_s = 220V$$

$$V_c = 220 V$$

$$L = 1mH$$

Pada Gambar 3.2, dengan menggunakan persamaan pembagi tegangan,

$$V_c = \frac{x_c}{x_c + x_L} V_s \dots \dots \dots (3.1)$$

dimana

$$x_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$x_L = 2\pi fL$$

Sehingga $C = 0.5 \mu F$

Dari persamaan 2.6:

$$\begin{aligned}
 f_c &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\
 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 10^{-6}}} \\
 &= 7117.62 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

3.2.3 Desain *Buck-Boost Converter*

Fungsi utama *buck-boost converter* adalah untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Namun pada sistem ini *buck-boost converter* digunakan sebagai rangkaian perbaikan faktor daya, untuk itu kontrol *switching* menggunakan SPWM agar *switching* pulsa dapat mengikuti bentuk sinusoidal tegangan *input*. Hal ini yang membuat pada sisi *input* dipasang sensor tegangan sebagai masukan untuk *swithing*. *Buck-boost* yang digunakan beroperasi pada mode DCM.

Dalam mendesain *buck-boost converter* diperlukan beberapa tahap dan perhitungan yang baik. Berikut data parameter yang digunakan:

- $V_{in} = 220 \text{ V}$
- $P_{out} = 100 \text{ W}$
- $V_{out} = 200 \text{ V}$
- $f_s = 150 \text{ kHz}$
- $L = 40 \mu\text{H}$
- $\Delta V_{out} = 0.01$

Dari data diatas, dapat dihitung nilai komponen yang digunakan adalah:

Arus output buck-boost converter dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.2

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \dots \dots \dots (3.2)$$

$$= \frac{100}{200}$$

$$= 0.5 \text{ A}$$

Setelah mengetahui nilai arus output kita dapat menghitung besarnya resistansi beban dengan persamaan 3.3

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$= \frac{200}{0.5}$$

$$= 400 \Omega$$

Dari persamaan 2.47, arus output maksimum adalah:

$$I_{OB \text{ max}} = \frac{T_s V_{out}}{2L}$$

$$= \frac{6.67 \times 10^{-6} \times 200}{2 \times 40 \times 10^{-6}}$$

$$= 16.67 \text{ A}$$

Selanjutnya untuk mengetahui nilai duty cycle rangkaian buck-boost converter sebagai rangkaian perbaikan faktor daya menggunakan persamaan 2.46

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{I_{out}}{I_{OB \text{ max}}}}$$

$$= \frac{200}{220} \sqrt{\frac{0.5}{16.67}}$$

$$= 0.157$$

Dan nilai Δ_1 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.44:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{\Delta_1}$$

$$\Delta_1 = \frac{220 \times 0.157}{200}$$

$$= 0.173$$

Arus yang melewati induktor dapat diketahui dengan persamaan 2.45:

$$I_L = \frac{V_{in}DT_s(D + \Delta_1)}{2L}$$

$$= \frac{220 \times 0.157 \times 6.67 \times 10^{-6}(0.157 + 0.173)}{2 \times 40 \times 10^{-6}}$$

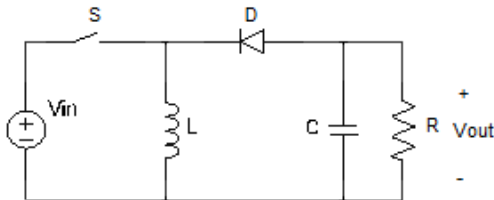
$$= 0.953 \text{ A}$$

Untuk mengetahui nilai kapasitor maka:

$$\Delta V_{out} = \frac{V_{out}DT_s}{RC} \dots \dots \dots (3.4)$$

$$0.01 = \frac{200 \times 0.157 \times 6.67 \times 10^{-6}}{400C}$$

$$C = 5.24 \times 10^{-5} \text{ F}$$



Gambar 3.3 Rangkaian *Buck-Boost Converter*

Dari perhitungan yang didapat maka dibuat simulasi rangkaian pada PSIM seperti Gambar 3.3.

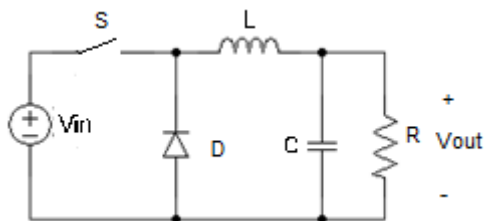
3.2.4 Desain *Buck Converter*

Rangkaian *buck converter* berfungsi untuk menurunkan tegangan. Sumber dc yang menjadi tegangan *input* dari *buck converter* berasal dari tegangan *output buck-boost converter* sebesar 200 V. Berikut adalah parameter yang digunakan untuk mendesain *buck converter*.

- $V_{in} = 200V$
- $f_{sw} = 20\text{ kHz}$
- $V_{out} = 60\text{ V}$
- $P_{out} = 100\text{ W}$
- $\Delta V_{out} = 0.01$

Dengan menggunakan persamaan 3.2, kita dapat mengetahui nilai arus output dari buck converter,

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{P_{out}}{V_{out}} \\ &= \frac{100}{60} \\ &= 1.667\text{ A} \end{aligned}$$



Gambar 3.4 Rangkaian *Buck Converter*

dan nilai resistansi beban berdasarkan persamaan 3.3 adalah:

$$\begin{aligned} R &= \frac{V_{out}}{I_{out}} \\ &= \frac{60}{1.667} \\ &= 36 \, \Omega \end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai awal dari duty cycle buck converter digunakan persamaan umum 2.23

$$\begin{aligned} V_{in} &= \frac{V_{out}}{D} \\ D &= \frac{V_{out}}{V_{in}} \\ &= \frac{60}{200} \\ &= 0.3 \end{aligned}$$

Δ_1 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.29,

$$\begin{aligned} \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{D}{(D + \Delta_1)} \\ \frac{60}{200} &= \frac{0.3}{(0.3 + \Delta_1)} \\ 0.3 + \Delta_1 &= \frac{60}{60} \\ \Delta_1 &= 1 - 0.3 \\ &= 0.7 \end{aligned}$$

Nilai dari duty cycle dan Δ_1 harus memenuhi persyaratan berikut:

$$\begin{aligned} D + \Delta_1 &< 1.0 \\ 0.3 + 0.7 &\geq 1.0 \end{aligned}$$

jadi set $\Delta_1 = 0.3$

Sehingga nilai besaran induktor pada buck converter dapat ditentukan dari persamaan 2.32.

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{V_{out} \times T_s}{2L} \times ((D + \Delta_1)\Delta_1) \\ 1.667 &= \frac{60 \times 5 \times 10^{-5}}{2L} \times ((0.3 + 0.3)0.3) \\ 3.33L &= 5.4 \times 10^{-4} \\ L &= 1.62 \times 10^{-4} \text{ H} \\ &= 0.162 \text{ mH} \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.38 dapat diketahui nilai dari arus induktor maksimum:

$$\begin{aligned} I_{LB,max} &= \frac{T_s V_o}{2L} \\ &= \frac{5 \times 10^{-5} \times 60}{2 \times 0.162 \times 10^{-3}} \\ &= 7.7 \text{ A} \end{aligned}$$

Untuk operasi konverter dimana tegangan output tetap konstan, perlu dihitung kembali duty cycle sebagai fungsi $I_{out}/I_{LB \max}$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \left(\frac{I_{out}/I_{LB \max}}{1 - V_{out}/V_{in}} \right)^{1/2}$$

$$= \frac{60}{200} \left(\frac{1.667/7.7}{1 - 60/200} \right)^{1/2}$$

$$= 0.166$$

dan arus induktor yang berada pada daerah *boundary* dapat dihitung dari persamaan 2.39

$$I_{LB} = (1 - D)I_{LB \max}$$

$$= 0.834 \times 7.7$$

$$= 6.5 \text{ A}$$

Berikut adalah persamaan untuk mengetahui besarnya nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian ini:

$$\Delta V_{out} = \frac{T_s}{8C} \times \frac{V_{out}}{L} \times ((1 - D)T_s) \dots \dots \dots (3.5)$$

$$0.01 = \frac{5 \times 10^{-5}}{8C} \times \frac{60}{0.162 \times 10^{-3}} \times ((1 - 0.16)5 \times 10^{-5})$$

$$C = 2.083 \text{ mF}$$

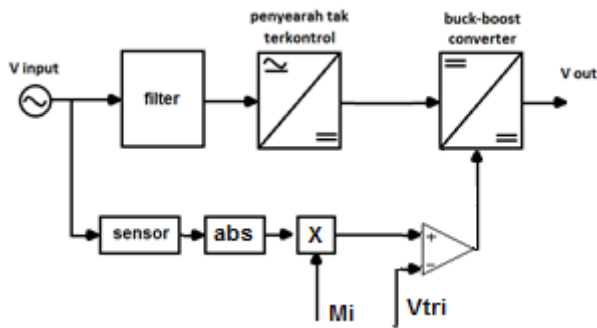
Setelah melakukan perhitungan dibuat simulasi rangkaian ini pada PSIM seperti pada Gambar 3.4.

3.2.5 Kontrol DC-DC Converter

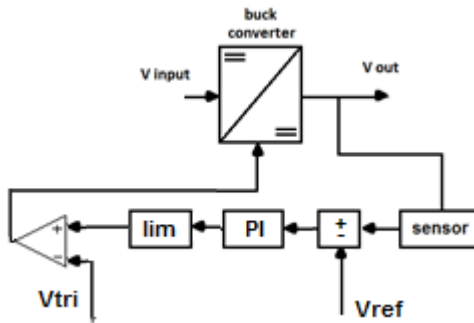
Pada dc-dc *converter*, tegangan *output* rata-rata harus dikendalikan demi mencapai tingkat yang diinginkan meskipun tegangan *input* dan *output* beban mungkin berfluktuasi. *Switch mode dc-dc converter* memanfaatkan satu atau lebih *switch* untuk mengubah dc dari satu level ke level lain. Kontrol pada dc-dc *converter* dilakukan dengan mengontrol durasi *on* dan *off* dari *switch*.

Kontrol dc-dc *converter* pada *stage* pertama menggunakan rangkaian Sinusoidal PWM yang tegangan kontrol berasal dari perkalian tegangan dari pembacaan sensor tegangan pada *input* penyearah yang telah disearahkan dengan tegangan modulasi (M_i) seperti terlihat pada Gambar 3.5. Modulasi tegangan ini bertujuan untuk membatasi besarnya nilai keluaran PWM agar tetap beroperasi pada mode DCM. Frekuensi pensaklaran yang digunakan adalah 150 KHz yang dapat diatur pada tegangan segitiga (V_{tri}) untuk *input* negatif komparator.

Pada *stage* kedua (*buck converter*) kontrol yang digunakan berfungsi untuk mengatur tegangan *output*. Dengan menggunakan PWM, tegangan kontrol berasal dari besarnya perbedaan antara pembacaan sensor tegangan dengan tegangan referensi yang kemudian dikontrol oleh PI dan dibatasi agar *buck converter* tetap bekerja pada daerah DCM. Oleh karena itu tegangan *output buck converter* dapat ditentukan nilainya dan dijaga tetap. Frekuensi *switching* yang digunakan adalah 20 KHz. Gambar 3.6 menunjukkan rangkaian kontrol *switch* pada *buck converter*.



Gambar 3.5 Kontrol pada *Buck-Boost Converter*



Gambar 3.6 Kontrol pada *Buck Converter*

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Power Simulator 9.0.3.400 (PSIM). Dari hasil simulasi seluruh sistem dibuat analisa dengan membandingkan hasil simulasi dari penyearah AC-DC konvensional dan penyearah AC-DC dengan *buck-boost converter* untuk perbaikan faktor daya. Parameter-parameter yang digunakan sebagai perbandingan kinerja dari dua buah penyearah ini adalah faktor daya (PF), efisiensi (dalam %), dan kestabilan tegangan *output* (V_o) jika beban ditambah. Pada saat dibebani penuh sistem ini bekerja dengan daya *output* 100 Watt.

4.1 Penyearah AC-DC Konvensional

Untuk menghasilkan tegangan *output* sebesar 60 V dan daya 100 Watt pada rangkaian penyearah AC-DC konvensional, dibuat simulasi yang tersusun dari transformator *step down*, empat buah dioda, dan kapasitor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Rangkaian simulasi penyearah AC-DC konvensional yang digunakan mempunyai parameter sebagai berikut.

$$\begin{aligned}V_{in} &= 220 \text{ V} \\ \text{rasio transformator} &4 : 1 \\ V_{DC} &= 60 \text{ V} \\ f &= 50 \text{ Hz} \\ P_{out} &= 100 \text{ W}\end{aligned}$$

Dari persamaan 2.1, tegangan pada sisi primer trafo adalah:

$$\begin{aligned}V_{in \max} = V_{primer} &= \sqrt{2} \times V_{in} \\ &= \sqrt{2} \times 220 \\ &= 311 \text{ V}\end{aligned}$$

dan tegangan pada sisi sekunder dengan perbandingan 4:1 adalah:

$$V_{sekunder} = \frac{311}{4} = 77.75 \text{ V}$$

Arus *output* penyearah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.2

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{P_{out}}{V_{out}} \\ &= \frac{100}{60} \\ &= 1.667 \text{ A} \end{aligned}$$

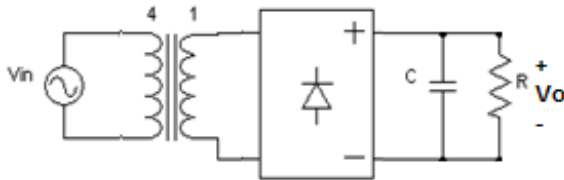
Setelah mengetahui nilai arus *output* kita dapat menghitung besarnya resistansi beban dengan persamaan 3.3

$$\begin{aligned} R &= \frac{V_{out}}{I_{out}} \\ &= \frac{60}{1.667} \\ &= 36 \Omega \end{aligned}$$

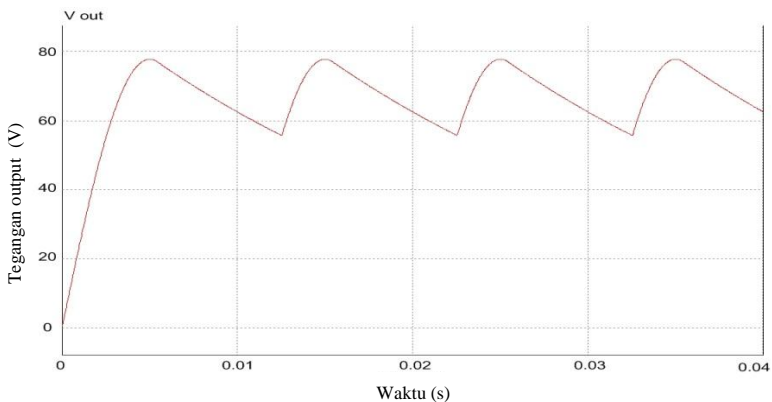
Sehingga nilai kapasitor yang digunakan adalah

$$\begin{aligned} V_{DC} &= V_{sekunder} - \frac{V_{sekunder}}{4fRC_e} \\ 60 &= 77.75 - \frac{77.75}{4 \times 50 \times 36 \times C_e} \\ C_e &= 6.08 \times 10^{-4} \text{ F} \end{aligned}$$

Penggunaan filter kapasitor pada sisi output dengan nilai yang cukup besar ini membuat tegangan output mempunyai nilai ripple tegangan yang rendah. Namun faktor daya pada sistem menjadi turun.



Gambar 4.1 Rangkaian Penyearah AC-DC

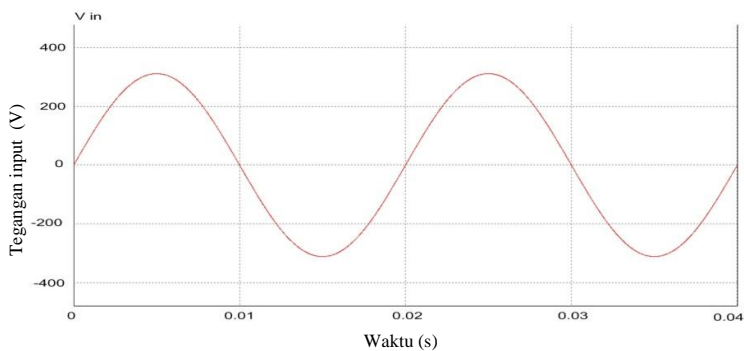


Gambar 4.2 Tegangan Output Penyearah AC-DC

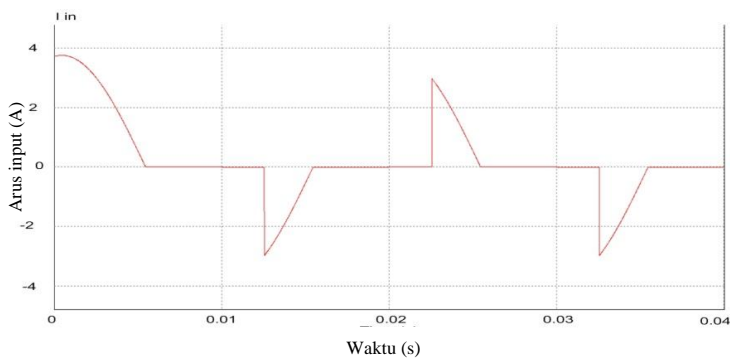
Gambar 4.2 adalah bentuk gelombang dari tegangan *output* penyearah AC-DC konvensional. Tegangan *output* dari penyearah konvensional ini masih mengandung *ripple* dengan nilai tegangan adalah 66.6 V. Namun simulasi yang dilakukan menggunakan daya beban yang berubah-ubah agar dapat dibandingkan dengan penyearah dengan perbaikan faktor daya menggunakan *buck-boost converter*.

Bentuk gelombang tegangan dan arus *input* penyearah AC-DC konvensional dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Tampak bahwa gelombang arus tidak berbentuk gelombang sinus dan tidak sefasa dengan gelombang tegangan *input*, maka gambar tersebut jelas memiliki faktor daya sumber yang rendah.

Data hasil simulasi penyearah AC-DC konvensional yang terdiri dari pengukuran tegangan dan arus *output*, daya *output*, dan faktor daya sistem dapat dilihat pada tabel 4.1.



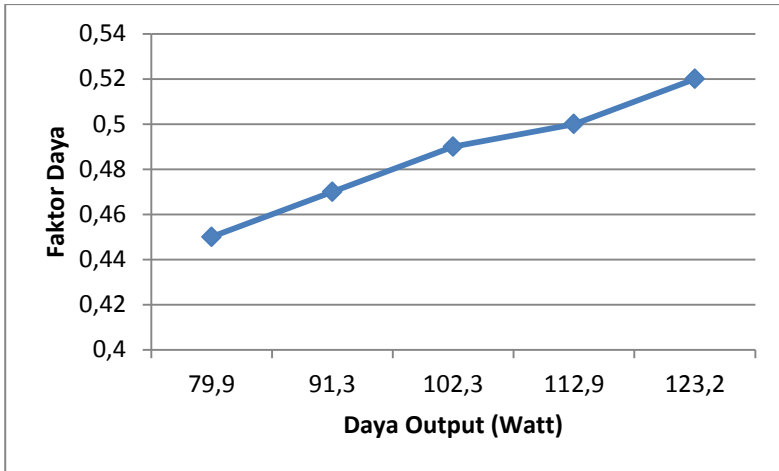
Gambar 4.3 Tegangan Input Penyearah AC-DC



Gambar 4.4 Arus Input Penyearah AC-DC

Tabel 4.1 Data hasil simulasi penyearah AC-DC konvensional

R (Ω)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (Watt)	Pf
36	66.6	1.85	123.2	0.52
40	67.2	1.68	112.9	0.50
45	67.8	1.50	102.3	0.49
51.42	68.5	1.33	91.3	0.47
60	69.2	1.15	79.9	0.45



Gambar 4.5 Grafik Perubahan Daya Beban Terhadap Faktor Daya

Karena penyearah ini menggunakan 4 buah dioda yang dihubungkan jembatan, maka nilai tegangan output penyearah tidak dapat dikontrol (tetap).

Berdasarkan hasil simulasi, perubahan daya berpengaruh pada besarnya nilai faktor daya seperti pada Gambar 4.5. Perubahan resistansi terhadap faktor daya tidak sebanding, semakin besar nilai resistansi maka faktor daya semakin turun begitu pula sebaliknya.

4.2 Penyearah AC-DC dengan *Buck-Boost Converter* untuk Perbaikan Faktor Daya

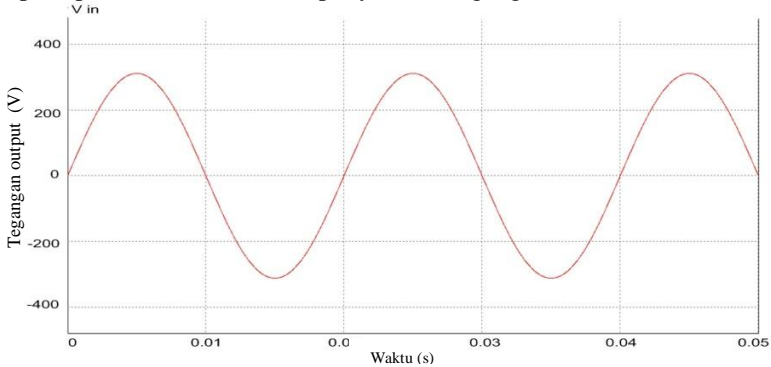
Rangkaian ini terdiri dari *low pass filter* pada sisi *input*, penyearah satu fasa tak terkontrol, *buck-boost converter* dengan SPWM untuk *switching* MOSFET sebagai rangkaian perbaikan faktor daya, dan *buck converter* dengan PWM untuk *switching* MOSFET sebagai pengatur tegangan *output*, seperti pada Gambar 3.1.

4.2.1 Penyearah AC-DC

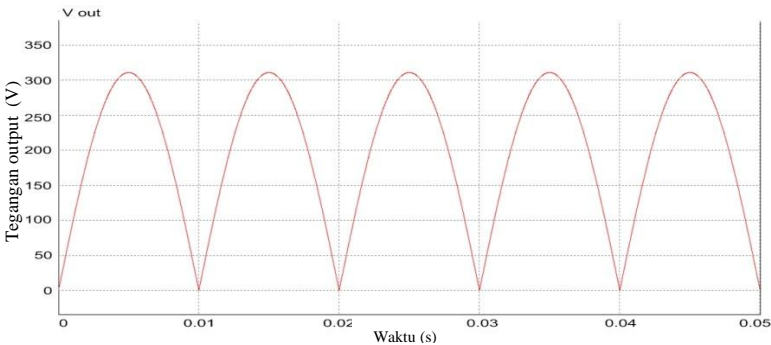
Berdasarkan perhitungan yang telah dibahas pada bab sebelumnya, data hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan data

hasil simulasi. Rangkaian penyearah AC-DC yang digunakan pada simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Gambar 4.6 adalah gelombang *input* dari penyearah AC-DC satu fasa dengan tegangan rms adalah 220V. Sehingga tegangan output DC seperti pada Gambar 4.7 mempunyai nilai tegangan rms 220V.



Gambar 4.6 Tegangan *Input* Penyearah AC-DC



Gambar 4.7 Tegangan Output Penyearah AC-DC

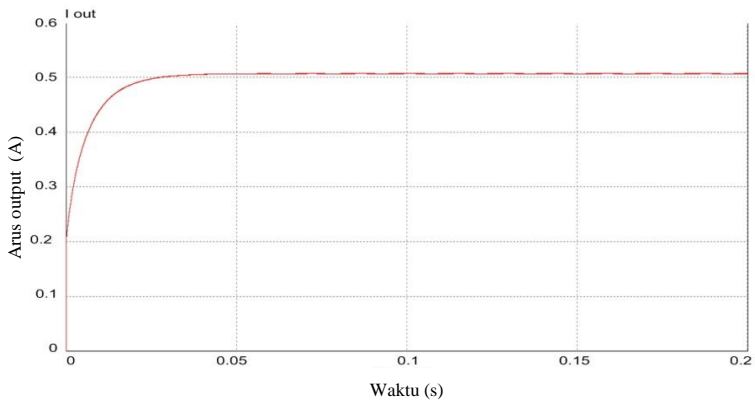
4.2.2 Buck-Boost Converter

Pada konverter level pertama (*buck-boost converter*) yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya, *switching* MOSFET diatur oleh rangkaian kontrol *close loop* menggunakan sebuah sensor tegangan pada sisi *input* dan berada pada daerah DCM.

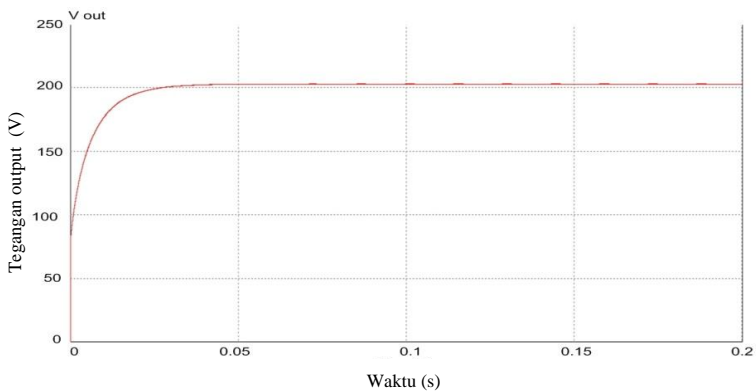
Seperti pada bab sebelumnya untuk membuktikan bahwa konverter bekerja pada DCM, dapat kita lihat dari arus yang melewati

induktor. Arus yang melewati induktor berdasarkan kerja *switching* pada MOSFET pada konverter level pertama ini dapat dilihat pada Gambar 4.10. Dari gambar 4.10 dapat dilihat proses pengisian dan pelepasan arus induktor, tegangan *output*, dan arus *output* berdasarkan pada *duty cycle* yang ditetapkan dengan nilai sesuai perencanaan buck-boost converter pada bab sebelumnya.

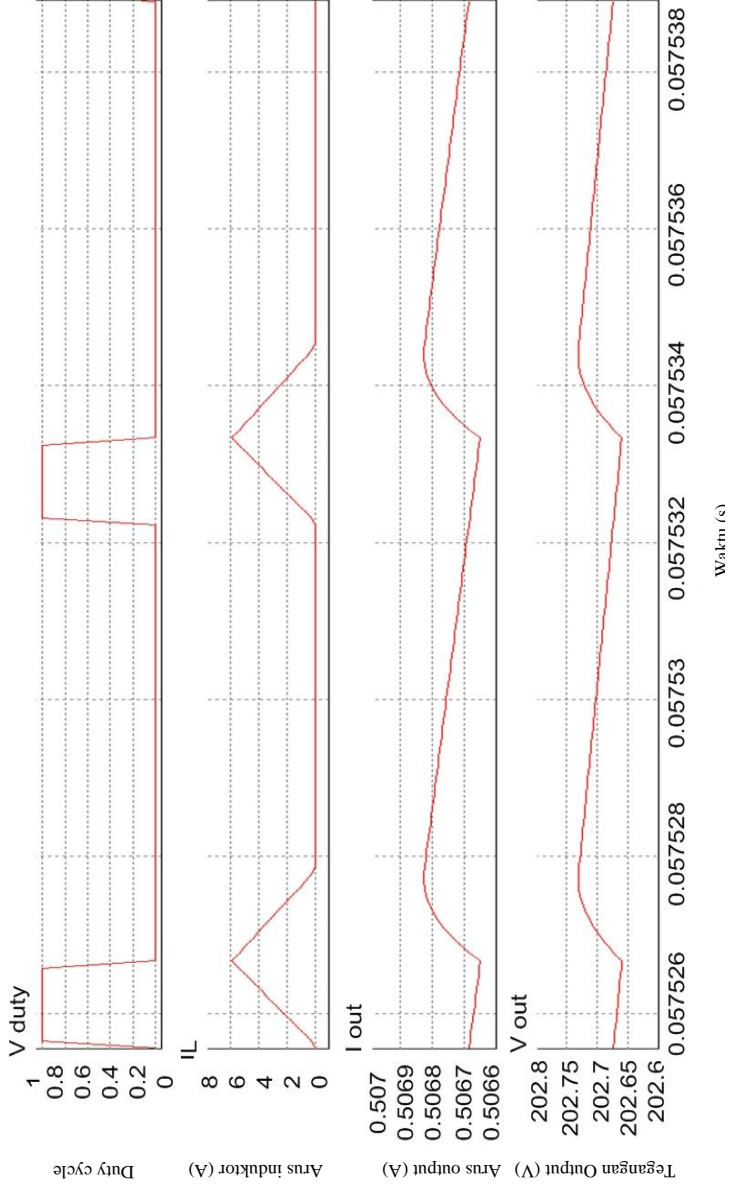
Arus output dari converter ini dapat dilihat pada Gambar 4.8 dengan nilai 0.5 A. Dan tegangan output converter pada Gambar 4.9 sebesar 200V.



Gambar 4.8 Arus Output Buck-Boost Converter



Gambar 4.9 Tegangan Output Buck-Boost Converter

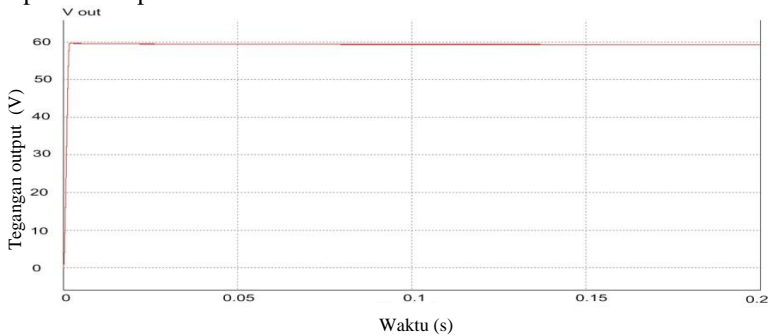


Gambar 4.10 Bentuk Gelombang pada Satu Periode Switching

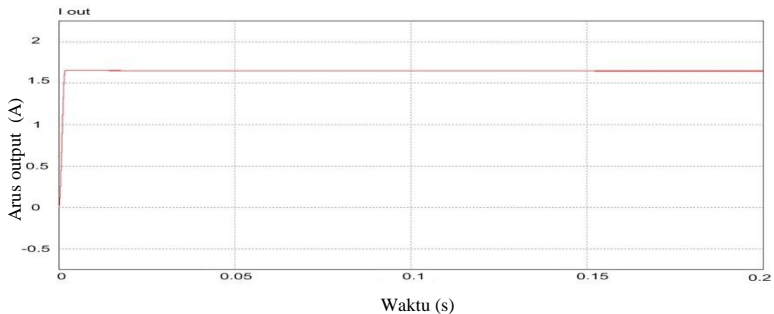
4.2.3 Buck Converter

Pada konverter level kedua (*buck converter*) yang digunakan untuk mengatur tegangan *output*, *switching* MOSFET diatur oleh rangkaian kontrol *close loop* menggunakan sebuah sensor tegangan pada sisi *output* dan berada pada daerah DCM. Arus yang melewati induktor pada konverter level kedua ini dapat dilihat pada Gambar 4.13. Dari gambar 4.13 dapat dilihat proses pengisian dan pelepasan arus induktor, tegangan *output*, dan arus *output* berdasarkan pada *duty cycle* dalam satu periode *switching*.

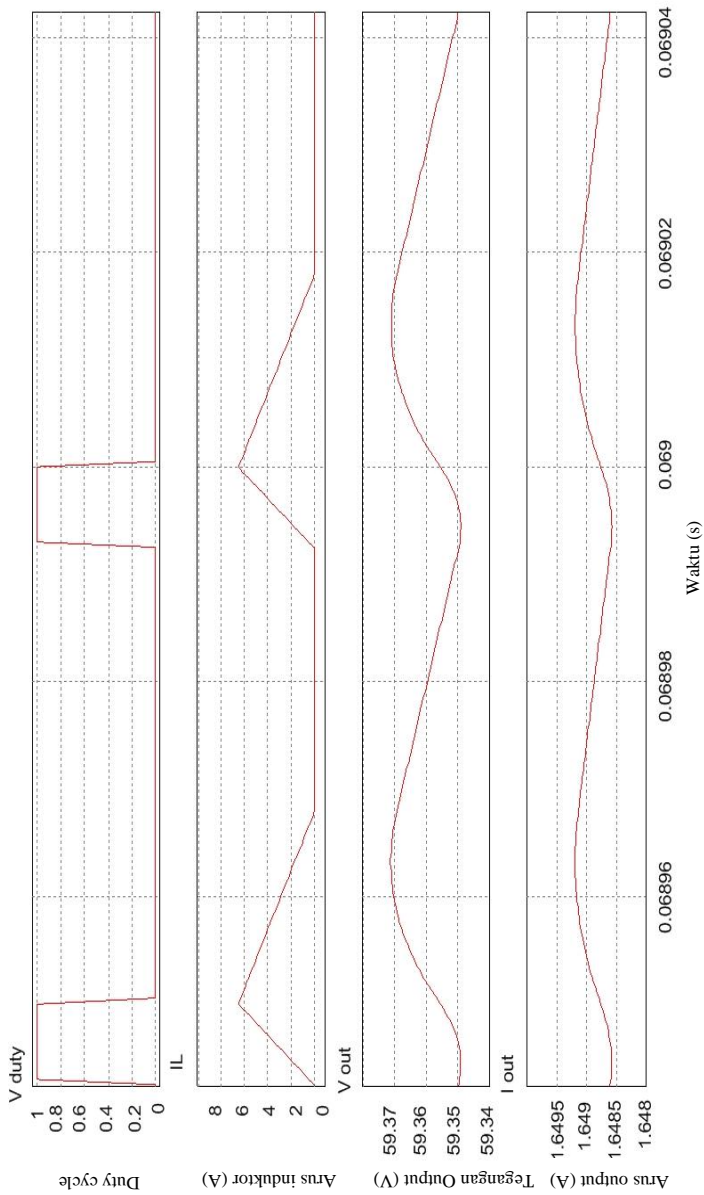
Nilai dari tegangan *output buck converter* mendekati nilai perhitungan pada bab sebelumnya yaitu 59.9 V dan arus *output buck converter* hasil simulasi juga tidak jauh berbeda dengan nilai perhitungan yaitu 1.66A. Gambar tegangan dan arus tegangan output dapat dilihat pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12



Gambar 4.11 Tegangan Output pada *Buck Converter*



Gambar 4.12 Arus Output pada Buck Converter



Gambar 4.13 Bentuk Gelombang pada Satu Periode Switching

4.2.4 Penyearah AC-DC dengan PFC dan Regulasi Tegangan

Gambar 4.14 menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan Gambar 4.15 adalah arus *input*. Gelombang arus *input* pada sistem ini sudah lebih baik daripada rangkaian penyearah AC-DC konvensional, karena arus *input* semakin mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Dari Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 dapat dilakukan pengukuran terhadap faktor daya pada PSIM. Hasil pengukuran power faktor sistem adalah 0.946. Nilai yang dihasilkan rangkaian penyearah satu fasa AC-DC dengan *buck-boost converter* mendekati ideal.

Berdasarkan gambar 4.15 dapat dihitung nilai arus input rms menggunakan persamaan 2.1 untuk fungsi arus, sehingga $I_s = 0.707$. Untuk mengetahui faktor daya sistem seperti pada persamaan 2.12 perlu dihitung nilai arus input rms fundamental (I_{s1}).

Fungsi arus input dapat dihitung dengan persamaan 2.13, dimana

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} -\sin \omega t \cos \omega t dt + \int_{\pi}^{2\pi} \sin \omega t \cos \omega t dt \right] = 0$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} -\sin \omega t \sin \omega t dt + \int_{\pi}^{2\pi} \sin \omega t \sin \omega t dt \right] = 1$$

Sehingga:

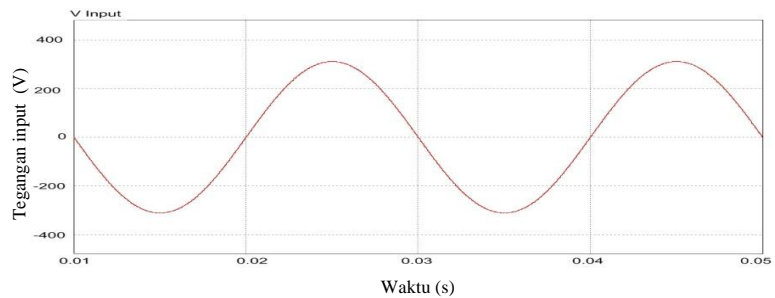
$$I_{s1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} = 0.707$$

Maka nilai faktor daya adalah:

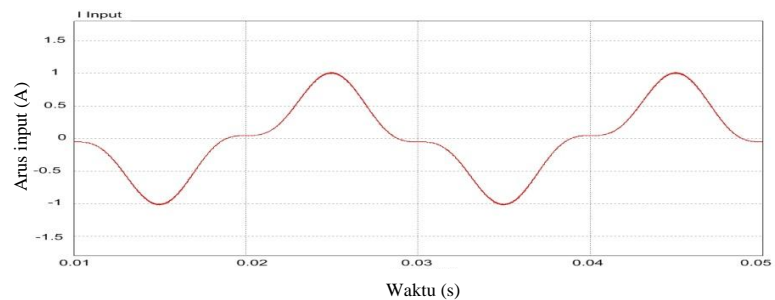
$$PF = \frac{I_s}{I_{s1}} = \frac{0.707}{0.707} = 1$$

Sama seperti pada penyearah AC-DC konvensional simulasi dilakukan dengan beban yang berubah-ubah. Untuk beban 100 Watt gambar gelombang tegangan *output* ditunjukkan pada Gambar 4.16. Gelombang ini mengandung *ripple* tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan penyearah AC-DC konvensional. Pada gelombang tegangan *output* terjadi osilasi sebelum menuju stabil, tetapi mempunyai waktu *settling* yang singkat. Untuk beban 90 Watt ditunjukkan pada gambar 4.17. Dapat diamati bahwa perubahan beban pada sistem tidak mempengaruhi tegangan output (tegangan output tetap bernilai 60 V).

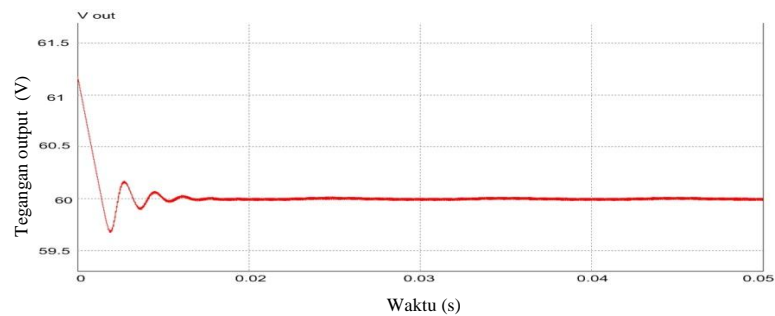
Data hasil simulasi penyearah AC-DC dengan *buck-boost converter* untuk perbaikan faktor daya yang terdiri dari pengukuran tegangan *output*, arus *output*, daya *output*, dan faktor daya sistem dapat dilihat pada tabel 4.2.



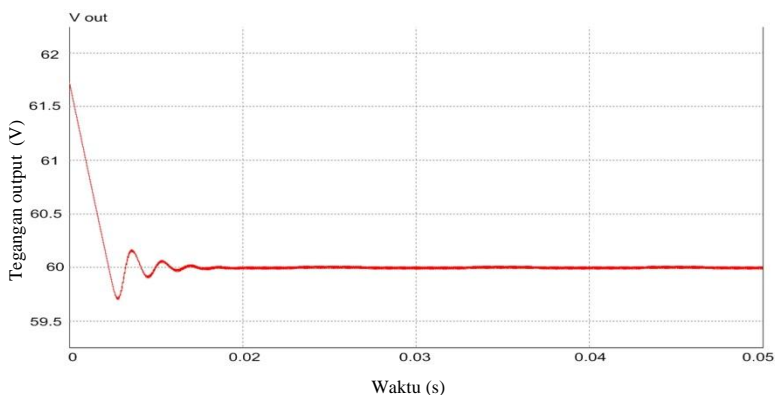
Gambar 4.14 Tegangan *Input*



Gambar 4.15 Arus *Input*



Gambar 4.16 Tegangan *Output* beban 100Watt



Gambar 4.17 Tegangan *Output* beban 90Watt

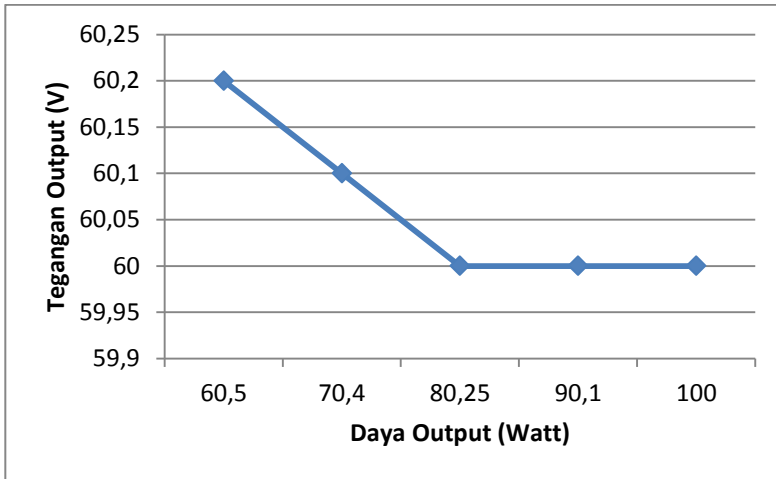
Tabel 4.2 Data hasil simulasi penyearah AC-DC dengan *buck-boost converter* untuk perbaikan faktor daya

R (Ω)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (Watt)	Pf
36	60	1.66	100	0.94
40	60	1.50	90.1	0.94
45	60	1.33	80.25	0.94
51.42	60.1	1.17	70.4	0.94
60	60.2	1.00	60.5	0.94

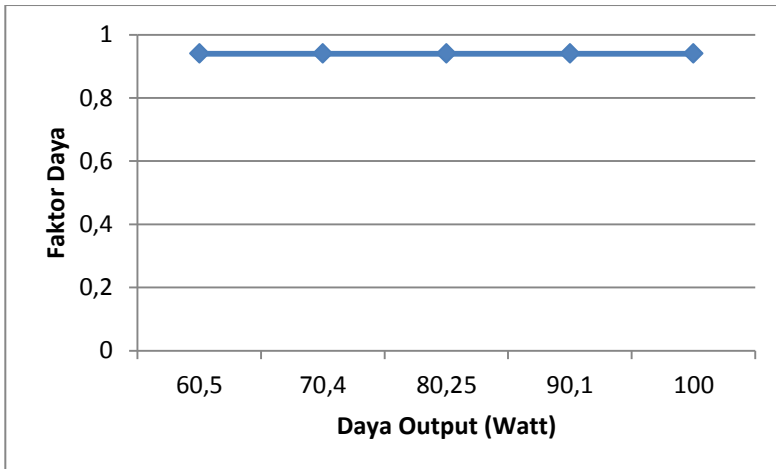
Karena penyearah ini menggunakan *buck converter* yang dapat mengatur tegangan *output*, maka nilai tegangan *output* penyearah dibuat tetap 60 V.

Dari Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa jika sewaktu-waktu ada perubahan daya beban maka tegangan *output* akan tetap dipertahankan pada nilai yang sudah diberikan sebelumnya.

Berdasarkan hasil simulasi, perubahan daya beban juga dibandingkan dengan besarnya nilai faktor daya. Tidak terjadi perubahan faktor daya terhadap perubahan daya beban seperti pada gambar 4.19.



Gambar 4.18 Grafik Perubahan Daya Beban Terhadap Tegangan Output



Gambar 4.19 Grafik Perubahan Daya Beban Terhadap Faktor Daya

4.3 Perbandingan Penyearah AC-DC Konvensional dan Penyearah AC-DC dengan Buck-Boost Converter untuk Perbaikan Faktor Daya

Perbandingan kinerja dari hasil simulasi kedua rangkaian dapat dilihat dari perbandingan tegangan *output* dan faktor daya. Sama dengan data sebelumnya, data ini dibandingkan dengan pengujian beban yang berubah-ubah.

Tegangan *output* yang diinginkan adalah konstan dengan perubahan beban. Pada penyearah konvensional tegangan *output* bertambah besar apabila daya beban dikurangi. Berbeda dengan penyearah yang dilengkapi dengan rangkaian perbaikan faktor daya, tegangan *output* lebih stabil (konstan) karena menggunakan rangkaian kontrol tegangan (*buck converter close loop*).

Gambar 4.19 dan Gambar 4.5 adalah grafik faktor daya terhadap perubahan beban pada kedua rangkaian penyearah. Faktor daya pada rangkaian penyearah konvensional akan terus turun seiring dengan berkurangnya daya beban. Pada rangkaian yang dilengkapi rangkaian perbaikan faktor daya, nilai faktor dayanya lebih tinggi dan stabil.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 5

KESIMPULAN & SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan pada Tugas Akhir ini dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Dengan menggunakan buck-boost converter pada rangkaian penyearah satu fasa faktor daya pada sisi sumber meningkat secara signifikan yaitu bernilai 0.94 dibandingkan dengan rangkaian penyearah konvensional yang bernilai rata-rata 0.48
2. Rangkaian *buck converter* pada penyearah satu fasa juga mampu mempertahankan kestabilan tegangan *output* jika beban berubah-ubah dimana pada penyearah menggunakan dioda tidak dapat dilakukan pengaturan tegangan.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat penulis berikan yang mungkin berguna untuk kedepannya adalah :

1. Untuk penelitian ke depan, diharapkan faktor daya dapat lebih tinggi dan mencapai *unity*.
2. Penggunaan *buck converter* sebagai pengatur tegangan dapat dilakukan bersamaan dengan pengaturan faktor daya.

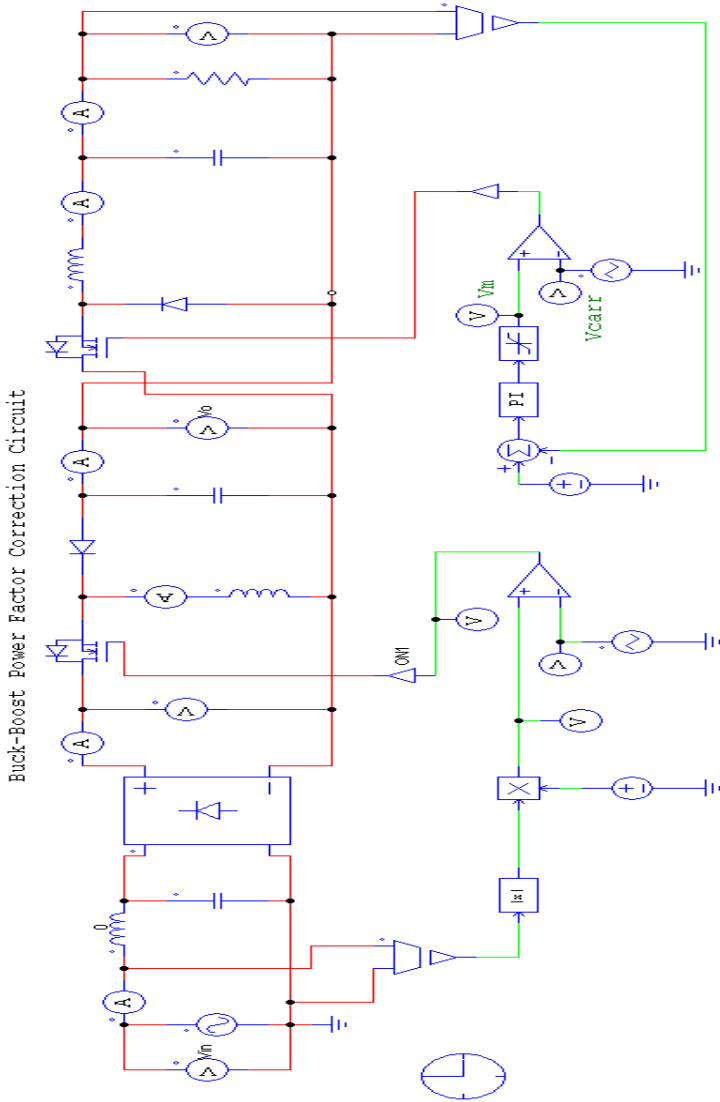
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M Nazir, '*Design of a Single Phase Unity Power Factor Switch Mode Power Supply with active power factor correction*', 2008
- [2] M.Phattanasak, V.Chunkag. "*Paralleling of single phase AC/DC converter with power factor correction.*" *Power Electronics Specialists Conference 35 th Annual IEEE*.2004.
- [3] Bor Ren Lin, Tsung liang Hung. '*Novel single-phase AC/DC converter with two PWM control schemes*', *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems.*, 2002, 38, (3)
- [4] T.-J.Liang, L.-S.Yang, and J.-F.Chen.: '*Analysis and design of a single-phase AC/DC step-down converter for universal input voltage*', *IET Electr. Power Appl.*, 2007, pp.778-784
- [5] Srinivasan, R., and Oruganti, R.: '*Single phase power factor correction - A review*', *IEEE Trans. Power Electron.*, 1997, 22, (6), pp. 753–780
- [6] Muhammad H Rashid, "Rangkaian Elektronika Daya, Devices, dan Aplikasinya", Jakarta, 1999
- [7] On Semiconductor, "*Power Factor Correction (PFC) Handbook*", Energy Efficient Innovations., 2014
- [8] Kamran Rezaei, "*A Control Single-Stage Buck-Boost PFC Converter with Improved Output Ripple Reduction*", 2012
- [9] Huai Wei, and Issa Batarseh , "*Comparison of Basic Topologies For Power Factor Correction*", *IEEE Senior Member.*, 1998
- [10] Kaushik Rajashekara, "*Power Electronics*", LLC, 2002
- [11] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "*Power Electronics: Converter, Application, and Design*", Wiley, Singapore, 1989
- [12] Malum Ambarita, "Studi Simulasi Perbaikan Faktor Daya pada Masukan Penyearah Satu Fasa Dioda Jembatan dengan Memakai Filter Parallel-Resonant", *USU Repository*, 2008

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Esty Wulandari lahir di Batam, 25 Maret 1991. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menyelesaikan sekolah menengah atas dari SMAN 1 Batam pada tahun 2009. Pada tahun yang sama diterima di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya jurusan Teknik Elektro Industri. Tahun 2012 penulis menyelesaikan program Diploma 3, pada tahun itu juga melanjutkan pendidikan untuk jenjang sarjana. Pendidikan sarjana ditempuh di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di jurusan Teknik Elektro bidang studi sistem tenaga.

Halaman ini sengaja dikosongkan